(E) ISSN: 3030-3214
Volume 3, № 3
2025

УДК: 669.21/.23 10.70769/3030-3214.SRT.3.3.2025.5

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ИОНООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ИЗВЛЕЧЕНИИ БЛАГОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ ИЗ ТЕХНОГЕННЫХ ОТХОДОВ МОЛИБДЕНОВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Вохидов Бахриддин Рахмидинович
Навоийский государственный и горно-технологический университет, доктор технических наук, профессор, Навои, Узбекистан

Эшонқулов Учқун Худайназар угли
д.ф.т.н., доц. Каршинский государственный технический университет, Карши, Узбекистан
ORCID ID: 0009-0002-8415-7218

Рустамов Исломжон Илхомович
Университет информационных технологий и менеджмента, Ташкент, Узбекистан

Аннотация. *В статье рассмотрено современное состояние и перспективы развития ионнообменных процессов в гидрометаллургии молибдена. Проведен анализ извлечения полиионных форм молибдена, формирующихся в кислой среде, с применением высокоселективных ионитов. Подробно рассмотрены процессы формирования фронта равных концентраций в слое ионита, кинетические параметры сорбции, а также конструктивные особенности и принципы действия различных типов сорбционных аппаратов, включая колонны СНК и пачуки. Отдельное внимание уделено безфильтрационному сорбционному выщелачиванию из пульп, внедренному в ведущих предприятиях отрасли, и его высокой эффективности.*

Ключевые слова: *молибден, гидрометаллургия, ионный обмен, ионит, сорбция, десорбция, полиионы, гидрометаллургический процесс, кинетика сорбции, слой ионита, фронт концентрации, ионнообменный аппарат.*

MOLIBDEN SANOATINING TEXNOGEN CHIQINDILARIDAN QIMMATBAHO METALLARNI AJRATIB OLISHDA ION ALMASHINUV JARAYONLARINI QO‘LLASH ISTIQBOLLARI

Vaxidov Bahriddin Raxmidinovich
Navoiy davlat konchilik va texnologiyalar universiteti, texnika fanlari doktori, professor, Navoiy, O‘zbekiston

Eshonqulov Uchqun Xudaynazar o‘g‘li
t.f.f.d., dots. Qarshi davlat texnika universiteti, Qarshi, O‘zbekiston

Rustamov Islomjon Ilhomovich
Axborot texnologiyalari va menejment universiteti, Toshkent, O‘zbekiston

Annotatsiya. *Maqolada molibden gidrometallurgiyasida ion almashinish jarayonlarining hozirgi holati va rivojlanish istiqbollari ko‘rib chiqilgan. Yuqori selektiv ionitlar yordamida kislotali muhitda hosil bo‘ladigan molibdenning poliion shakllarini ajratib olish tahlil qilingan. Ionit qatlamida teng konsentratsiyali frontning shakllanish jarayonlari, sorbsiyaning kinetik parametrlari, shuningdek, turli xildagi sorbsion qurilmalarning, jumladan, SNK kolonnalari va pachuklarning konstruktiv xususiyatlari va ishlash tamoyillari batafsil ko‘rib chiqilgan. Tarmoqning yetakchi korxonalarida joriy etilgan bo‘ta-*

(E) ISSN: 3030-3214
Volume 3, № 3
2025

nadan filtrsiz sorbsion tanlab eritmaga o‘tkazish va uning yuqori samaradorligiga alohida e’tibor qaratilgan.
Kalit so‘zlar: *molibden, gidrometallurgiya, ion almashinish, ionit, sorbsiya, desorbsiya, poliionlar, gidrometallurgik jarayon, sorbsiya kinetikasi, ionit qatlami, konsentratsiya fronti, ion almashinish apparati.*

PROSPECTS FOR APPLYING ION-EXCHANGE PROCESSES IN THE EXTRACTION OF PRECIOUS METALS FROM TECHNOGENIC WASTE OF THE MOLIBDENE INDUSTRY

Vokhidov Bakhriddin Rakhmidinovich
Navoi State Mining and Technological University, Doctor of Technical Sciences, Professor, Navoi, Uzbekistan

Eshonkulov Uchkun Khudaynazar ugli
PhD, doc. Karshi State Technical University, Karshi, Uzbekistan

Rustamov Islomjon Ilkhomovich
University of Information Technology and Management, Tashkent, Uzbekistan

Abstract. *This article explores the current state and development prospects of ion exchange processes in the hydrometallurgy of molybdenum. The study analyzes the sorption behavior of polyionic molybdenum complexes formed in acidic media and their selective extraction using specialized ion-exchange resins. The dynamics of ion concentration front formation, the kinetics of sorption processes, and the operating principles of various ion exchange apparatus (such as sorption columns, SNK, and Pachukas) are examined in detail. Moreover, the article presents the advantages and efficiency of pulp-based filtration-free leaching sorption technologies already implemented in industry.*
Keywords: *molybdenum, hydrometallurgy, ion exchange, ionite, sorption, desorption, polyions, hydrometallurgical process, sorption kinetics, ionite layer, concentration front, ion-exchange apparatus.*

Введение. На сегоднящнем этапе развития гирометаллургии редких и благородных, широко и успешно применяются ионообменные процессы извлечения молибдена из различных молибден содержащих продуктивных растворов и промыщленных стоков. Научным обоснованием внедрения ионообменных процессов в переработке продуктивных растворов является образование в кислой среде различных полионов молибдена.

Известно, что полиионы избирательно сорбируется ионообменными смолами, выбор ионита зависит от сдержания извлекаемого металла, солевого состава раствора, условий проведения процесса, а также физико-химических и механических свойств ионита и качества получеемого конечного продукта [1-3].

Материалы и методы. Исходя из приведенного аналитического обзора литературы можно сделать вывод о том, что исследования по интенсификации процессов сорбционного извлечения молибдена и рения из различных промышленных растворов является перспективным.

Блогадаря научно-техническому прогрессу в совершенствовании гидрометаллургических способов переработки руд и концентратов редких и благородных металлов успешно внедряются новые современные ионообменные процессы и аппараты в ведущих компаниях мирового бизнеса. Разработки с применением ионообменных процессов внедрены в области извлечения редких металлов из разбавленных, сбросных растворов, а также синтезированные иониты имеют высокую селективность к извлекаемому металлу и емкостные характеристики. Создана и работает целая отрасль по синтезу и производству иоонообменных смол различной марки.

Из литературных источников известно, что глубоко изучены сорбционные процессы, так же физико-химические свойства ионообменных смол и влияние различных факторов на процесс сорбции извлекаемых металлов. В сорбционных технологиях весьма, важную роль играют статические факторы процесса (параметры

(E) ISSN: 3030-3214
Volume 3, № 3
2025

ионообменного равновесия), кинетические факторы (скорость обмена) и скорость движения раствора. Одновременный их учет дает так называемую динамику сорбции. В динамических условиях представляется два периода сорбции: 1) периоде формирования фронта равных концентраций, $\tau_{пар}$ (рис.1). фронта равных концентраций (работающего слоя) τ_0; 2) периоде параллельного переноса

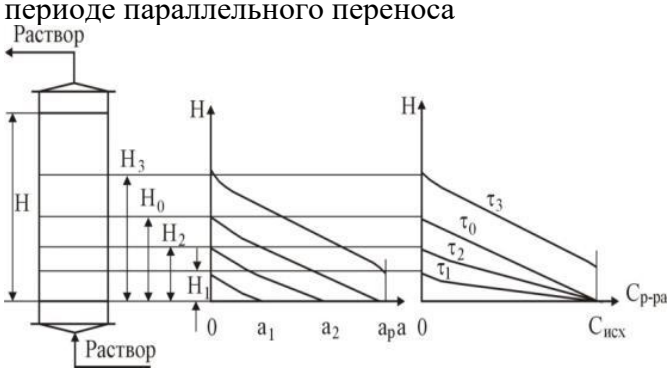

Рис.1. Схема формирования фронта равных концентраций в неподвижном слое ионита.

Согласно рис. 1., в момент времени τ_1 начальный слой ионита насыщен поглощаемым ионом до емкости a_1, а проскок извлекаемого иона наблюдается при высоте слоя ионита менее H_1, при τ_2 начальный слой ионита насыщен до емкости a_2, проскок происходит в слое ионита менее H_2, наконец, при времени τ_0 начальный слой ионита насыщен до емкости a_pa, равновесной с исходной концентрацией раствора $C_{исх}$, в слое ионита высотой H_0 концентрация извлекаемого иона изменяется от $C_{исх}$ до 0 [2].

Рабочий слой ионита (H_0) сформирован. Далее происходит параллельный перенос образованного фронта концентраций. К моменту времени τ_3 до равновесной емкости насыщен слой ионита H_1, проскок наблюдается при высоте слоя ионита менее H_3 .

Полное время (τ) работы слоя ионита высотою H будет равно сумме времени формирования фронта концентраций (τ_0) и времени параллельного переноса фронта концентраций ($\tau_{пар}$):

$$\tau = \tau_0 + \tau_{пар} = \tau_0 + (H - H_0)/U$$

где, U – скорость перемещения фронта концентраций, ее величина определяется равновесной емкостью ионита, скоростью течения раствора и исходной концентрацией извлекаемого вещества в растворе.

Величина, обратная скорости параллельного передвижения фронта K=1/U называется коэффициентом защитного действия и представляет собой время, в течение которого слой ионита высотой 1 м полностью насыщается извлекаемым веществом. Для определения времени защитного действия слоя ионита нужно найти высоту рабочего слоя ионита H_0.

При внешне диффузионной кинетике процесса скорость изменения концентрации извлекаемого вещества в растворе по высоте рабочего слоя ионита описывается уравнением:

$$dC/d\tau = -\beta_1(C - C_{пр})$$

где, β_1 – кинетический коэффициент внешней диффузии, $C_{пр}$ – концентрация извлекаемого вещества в растворе при проскоке, близкая к нулю.

Таким образом, время защитного действия слоя ионита находят из уравнения:

$$\tau = \frac{a_p}{\omega \cdot C_{исх}} \cdot H - \frac{a_p}{\beta_1 C_{исх}} \left(ln \frac{C_{исх}}{C_{пр}} - 1 \right)$$

Причины появления потери времени защитного действия, следующие:

1) ионообменное равновесие устанавливается не мгновенно, часть извлекаемого вещества, не успев насытить первый слой, поглощается в последующих;

2) наблюдается канальный проскок раствора, связанный с неравномерностями укладки зерен ионита;

3) «стеновой» эффект – более быстрое продвижение потока у стенок

Исследование вышеизложенных факторов, влияющих на эффективность протекания ионообменых процессов, является теоретической основой при разработке технологических процессов ионного обмена, выбора сорбента и типа конструкции аппаратов и сорбционных колонн.

Извлечение металлов из растворов может производиться как периодически, так и непрерывно. На рисунке 2 изображено устройство ионообменной колонны периодического действия.

Когда раствор пропускается последовательно через 1, 2 и 3 колонны, 4-я колонна находится на регенерации смолы. Перед

(E) ISSN: 3030-3214
Volume 3, № 3
2025

наступлением проскока урана из 3-й колонны исходный раствор перемещается на 2-ю колонну, за 3-й колонной подключается 4-я со свежерегенерированной смолой, а 1-я колонна ставится на регенерацию.

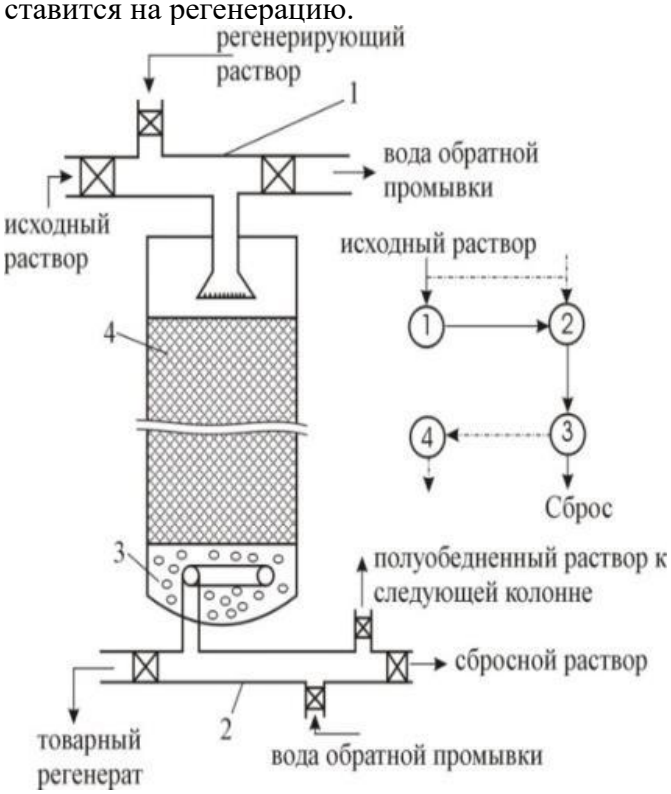

Рис.2. Ионообменная колонна периодического действия:

1 – верхняя гребенка; 2 – нижняя гребенка; 3 – гравий; 4 – слой ионита.

Данная колонна может работать только на растворах и не годится для переработки пульп. Основным недостатком этой системы является периодичность процесса, необходимость проведения соответствующих переключений потоков, которые производятся чаще, чем выше солесодержание перерабатываемых растворов. Поэтому такие колонны остались там, где переключения потоков проводятся реже, например, для обессоливания морской/речной воды на АЭС, для обезвреживания сточных вод с малым солесодержанием. Далее приводим принцип работы сорбционной колонны СНК (рисунок 3) [5-6].

Исходный раствор под давлением подается в нижнюю часть колонны и продвигается вверх навстречу потоку смолы. В верхней части колонны раствор проходит фильтрующие патроны, которые задерживают смолу, направляется на дальнейший передел переработки.

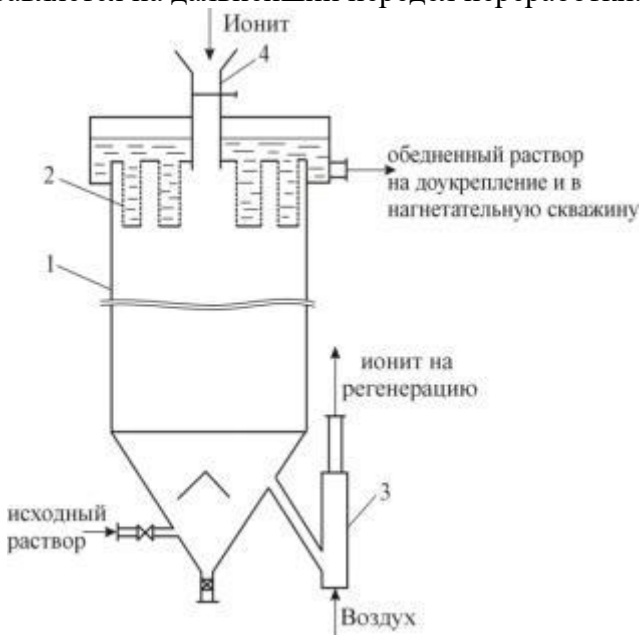

Рис.3. Сорбционная колонна (СНК):

1 – корпус; 2 – фильтры; 3 – аэролифт; 4 – загрузочный бункер ионита.

При работе колонны в ней одновременно находятся три слоя ионита. В верхней части колонны – слой свежего ионита, который обеспечивает снижение концентрации до установленного значения, в средней части колонны формируется фронт рабочих концентраций, высота фронта зависит от емкости ионита, концентрации металла в продуктивном растворе, скорости движения раствора (25–35 м/час), она составляет 5–6 м. В нижней части колонны собирается слой насыщенного ионита. Колонна работает в полунепрерывном режиме. Периодически при кратковременном прекращении подачи исходного раствора в аэролифт подается воздух и из колонны перегружается определенная порция насыщенного ионита, которая направляется на десорбцию. После этого в колонну загружается свежая смола объемом, равным объему перегруженной порции. После этого возобновляется подача исходного раствора в колонну. При этих операциях фронт рабочих концентраций удерживается в средней части колонны.

В производстве гидрометаллургии редких металлов успешно внедрены сорбционные процессы в противоточных колоннах со

(E) ISSN: 3030-3214
Volume 3, № 3
2025

взвешенным слоем смолы в непрерывном режиме – в каскаде сорбционных напорных колонн (СНК). Эти колонны успешно работают в Карабалтиноском ГМК (производство оксида молибдена), в ТОО «Джезказганредмет» (производство солей аммония рениевокислого), на НПО АО «Алмалыкский ГМК» (производство оксида молибдена, вольфрама и рения), ТОО Степногорский ГХК (производство оксида молибдена). Известно, для извлечения урана из из автоклавной пульпы содового выщелачивания урана в Степногорске применены ионообменые колонны - пачуки (рисунок 4).

Результаты. Ионообменный пачук представляет собой цилиндрический аппарат диаметром 3–6 м и высотой 10–20 м. В нижней части находится коническое днище с углом конуса 60° для предотвращения накопления твердых частиц на днище. Для обеспечения взвешенного состояния пульпы и смолы устанавливается циркулятор с воздухораспределителем. Диаметр циркулятора составляет 10–20% от диаметра пачука, высота циркулятора – до 1/3 высоты слоя пульпы, нижний край циркулятора устанавливается на расстоянии не более 0,5 м от низа аппарата. Для перемешивания смолы и пульпы в циркулятор подается воздух в количестве 4 – м^3/час на каждый кубометр пульпы. Для организации противоточного движения смолы и пульпы в верхней части пачука устанавливаются дренажные сетки, на которые с помощью аэролифтов подается смесь смолы и пульпы. Раствор с твердыми частицами пульпы проходит через сетки в ящики, откуда самотеком перемещается в следующий аппарат [3,5,7].

Частички смолы скатываются с сетки обратно в аппарат или в желоб, откуда перемещаются в другой аппарат навстречу потоку пульпы. Количество сеток, работающих на выдачу пульпы и смолы, определяется отношением времени пребывания пульпы и смолы в аппарате. В каскаде «сорбции» устанавливаются 8–12 ионообменных пачуков, в каскаде «десорбции» – или 4–6 пачуков меньшего размера. Между каскадами «сорбции» и «десорбции» устанавливаются промывные колонны с противоточным движением смолы и воды. Промывные воды, снимающие пленки исходной пульпы со смолы, возвращаются на «сорбцию», а промывные воды, снимающие со смолы пленки «десорбирующего» раствора, используются для приготовления исходных пульп.

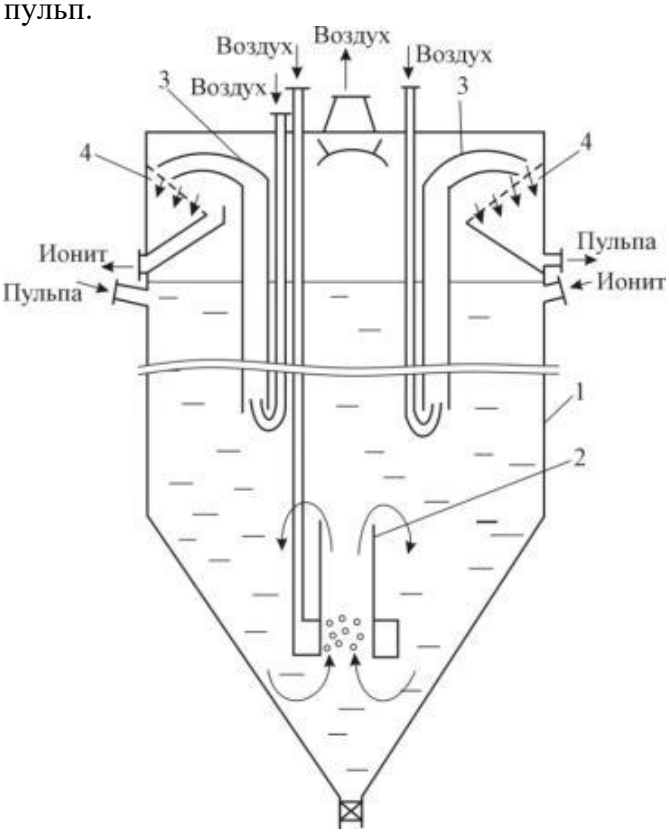

Рис.4. Ионообменный пачук:
1 – корпус; 2 – дефлектор; 3 – аэролифты; 4 – грохоты.

Внедрение процесса сорбции из пульп позволило на 5–10% повысить извлечение металлов, снизить в 2–3 раза энергозатраты, в 3–4 раза повысить производительность труда, сэкономить в большом количестве фильтрующие ткани и в несколько раз увеличить мощность предприятий. Эффективность сорбции из пульп значительно возрастает при совмещении процессов сорбции и выщелачивания. При введении ионита на стадии выщелачивания повышается извлечение ценных компонентов, существенно сокращается общее время обработки рудного материала, так как одновременно протекает перевод извлекаемого металла в раствор с дальнейшей сорбцией металла в ионит.

После разделения ионита от пульпы рудного материала на отсадочных аппаратах из

(E) ISSN: 3030-3214
Volume 3, № 3
2025

насыщенного сорбента десорбируют металл в колоннах СНК, регенерированный сорбент возвращают в голову процесса сорбционному выщелачиванию в пульпе. Этот уникальный процесс назван академиком РАН Б.Н.Ласкорином «Безфильтрационное выщелачивание руд редких металлов и золота». Процесс внедрен на предприятиях Росатома и ТОО ЦГХК (СГХК) при переработке урановых руд, а также на ГП «Навоийский ГМК» при переработке золотых руд.

Заключение. Таким образом, использование ионнообменных процессов в гидрометаллургии молибдена представляет собой эффективное и перспективное направление для извлечения ценных металлов из растворов и пульп. Научное обоснование применяемых методов, широкая вариативность аппаратов (от периодических колонн до непрерывных сорбционных систем), а также внедрение новых технологий, таких как безфильтрационное выщелачивание, значительно повышают экономическую эффективность и экологическую безопасность производства. Современные разработки в области синтеза ионитов с высокой селективностью открывают новые горизонты для дальнейшей интенсификации и автоматизации процессов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хакимов, К. Ж., Каюмов, О. А. У., Эшонкулов, У. Х. У., & Соатов, Б. Ш. У. (2020). ТЕХНОГЕННЫЕ ОТХОДЫ-ПЕРСПЕКТИВНОЕ СЫРЬЕ ДЛЯ МЕТАЛЛУРГИИ УЗБЕКИСТАНА В ОЦЕНКЕ ОТВАЛЬНЫХ ХВОСТОВ ФИЛЬТРАЦИИ МЕДНО-МОЛИБДЕНОВЫХ РУД. *Universum: технические науки*, (12-1 (81)), 54-59.
2. Djurayevich, K. K., Kxudoynazar O'g'li, E. U., Sirozhevich, A. T., & Abdurashidovich, U. A. (2020). Complex Processing Of Lead-Containing Technogenic Waste From Mining And Metallurgical Industries In The Urals. *The American Journal of Engineering and Technology*, *2*(09), 102-108.
3. Шодиев, А. Н. У., Туробов, Ш. Н., Саидахмедов, А. А., Хакимов, К. Ж., & Эшонкулов, У. Х. У. (2020). Исследование технологии извлечения редких и благородных металлов из сбросных растворов шламового поля. *Universum: технические науки*, (5-1 (74)), 37-40.
4. Эшонкулов, У. Х. У., Олимов, Ф. М. У., Саидахмедов, А. А., Туробов, Ш. Н., Шодиев, А. Н. У., & Сирожов, Т. Т. (2018). Обоснование параметров контурного взрывания при сооружении горных выработок большого сечения в крепких породах. *Достижения науки и образования*, (19 (41)), 10-13.
5. Хакимов, К. Ж., Эшонқулов, У. Х., & Умирзоқов, А. (2020). Complex Processing Of Lead-Containing Technogenic Waste From Mining And Metallurgical Industries In The Urals. *THE AMERICAN JOURNAL OF ENGINEERING AND TECHNOLOGY (TAJET) SJIF-5.32 DOI-10.37547/tajet*, *2*(9), 2689-0984.
6. Турдиев, Ш. Ш., & Эшонкулов, У. Х. (2023). ИССЛЕДОВАНИЕ ХИМИЧЕСКИХ СОСТАВОВ ЦИНКОВЫХ ОТХОДОВ И ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКЕ. *Наука и технология в современном мире*, *2*(18), 28-32.
7. Nasirov, U., Umirzokov, A., Nosirov, N., Fatkhiddinov, A., Eshonkulov, U., & Kushnazorov, I. (2024). Study of the Production and Efficiency of Variable and Loading Equipment in the Mining of Minerals. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 491, p. 02022). EDP Sciences.